

МИКРОФИЗИКА РАЗРУШЕНИЯ ПЫЛИ: МАЛЕНЬКИЕ КАТАСТРОФЫ ВСЕЛЕНСКИХ МАСШТАБОВ

Д. З. Вибе, М. С. Мурга, Е. Э. Сивкова

Институт астрономии Российской академии наук

Несмотря на многочисленные исследования, природа космических пылинок до сих пор известна нам только в общих чертах. Интерпретация наблюдений отчасти затруднена тем, что универсальной модели космической пыли не существует. Наблюдения убедительно свидетельствуют, что свойства пыли заметно варьируются и в пределах нашей Галактики, и тем более за ее пределами. Одним из ключевых процессов, определяющих параметры ансамбля пылевых частиц, является их разрушение в результате действия нескольких факторов. В лекции будут описаны микрофизические аспекты этого процесса, преимущественно в отношении органических пылинок.

MICROPHYSICS OF DUST DESTRUCTION: SMALL CATASTROPHES ON THE UNIVERSE SCALE

D. S. Wiebe, M. S. Murga, E. E. Sivkova

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Despite numerous studies we are still only aware of general features of the space dust nature. Interpretation of observations is in part hampered by the fact that the universal dust model simply does not exist. Observations definitely prove that dust properties vary significantly both within the Galaxy and even more so beyond its limits. One of the key processes, defining parameters of the dust grain ensemble, is their destruction under the action of several factors. In the lecture microphysical aspects of this process will be described, mostly in their relation to organic particles.

Введение

Один из основных компонентов нашей Вселенной — пыль. Она играет значительную роль в тепловом балансе межзвездного вещества, используется в качестве мощного инструмента для диагностики

физических свойств межзвездной среды и, наконец, является важным фактором, искажающим результаты многих астрономических наблюдений. Это означает, что свойства космической пыли необходимо знать даже в тех случаях, когда сама по себе пыль исследователя не интересует.

Неудивительно, что исследования космической пыли привлекают значительное внимание как наблюдателей, так и теоретиков. Несмотря на это, природа космических пылинок во многом остается загадкой [1]. Фактически уверенно мы можем говорить лишь о том, что космические пылинки представляют собой смесь углистых и силикатных частиц с некоторым вкладом ароматических соединений либо в виде самостоятельных частиц, либо в виде структурного элемента более сложных гранул.

Ситуация осложняется тем, что универсальная модель пыли, которой можно было бы пользоваться при интерпретации широкого круга наблюдений, возможно, вообще отсутствует. На это указывает, например, различие кривых межзвездного ослабления в различных направлениях от Солнца [2], в темных глобулах [3], в других галактиках [4]. Причины этих различий кажутся очевидными: странствуя по галактике, пыль эволюционирует, и потому единства ее свойств не может быть в принципе. Это означает, что для корректной интерпретации наблюдений ансамбля пылевых частиц мы должны включать в модели процессы их роста и разрушения.

В этой лекции мы поговорим о процессах разрушения пылинок. Их рост в проэволюционировавших звездах, остатках сверхновых, молекулярных облаках и протопланетных дисках — отдельная большая тема.

Под разрушением понимается отрыв некоторого количества вещества пылинки, вплоть до отдельных атомов, в результате чего масса и размер пылинки уменьшаются. Как правило, разрушение представляет собой длительный процесс, а не одномоментное исчезновение пылевой частицы. Различают несколько механизмов разрушения пыли:

- *тепловое испарение* — разрушение пылинки в результате ее нагрева до температуры сублимации;
- *распыление* — разрушение пылинки в результате ее взаимодействия с частицами газа или фотонами;
- *дробление* — разрушение в результате столкновений пылинок друг с другом.

Первый механизм эффективен только в непосредственных окрестностях звезд или в протозвездах, поскольку температура сублимации вещества пылинок достаточно высока ($\sim 1\,000\text{ K}$), поэтому в целом в межзвездной среде разрушение пылинок происходит в результате распыления и (или) дробления. Существует, впрочем, особый случай — разрушение ледяных мантий, намерзающих на пылинки в плотных холодных молекулярных облаках. Температура сублимации вещества мантий может быть очень низкой, вплоть до $\sim 20\text{ K}$ для наиболее летучих молекул. Поэтому мантии могут испаряться даже при незначительном нагреве, недостаточном для испарения тугоплавких ядер (в астрохимии распыление и испарение мантий часто называют общим термином «десорбция»). Однако в дальнейшем речь будет идти главным образом об испарении самих пылинок, а не намерзшего на них льда.

Взаимодействие с частицами газа

Распыление твердого вещества пылинки при столкновении с частицей газа является каскадным процессом, в ходе которого частица передает свою кинетическую энергию атомам твердого вещества, они, в свою очередь, передают ее другим соседним атомам и т. д. Некоторые из атомов при этом приобретают достаточную энергию, чтобы оторваться от поверхности пылинки. Основной характеристикой этого процесса является коэффициент распыления Y , который представляет собой число выбитых атомов в расчете на одну бомбардирующую частицу [5, 6]. Для данного сочетания вещества пылинки и типа бомбардирующих частиц коэффициент распыления зависит от энергии частицы E и угла падения θ : $Y = Y(E, \theta)$. В зависимости от частицы и бомбардируемой поверхности величина Y может варьироваться в пределах от 10^{-5} до 10^3 [7]. Очевидно, что существует некоторая пороговая энергия E_{th} , такая что частицы с энергией ниже E_{th} не способны вызвать распыление вещества мишени. При росте энергии коэффициент распыления растет, достигает максимума Y_{max} при энергии E_{max} , а потом спадает, так как частицы с большой энергией пронзают пылинку насквозь.

В таблице приводятся параметры распыления для основных материалов космических пылинок и бомбардирующих частиц по данным [8] (коэффициент распыления усреднен по углам падения). Пороговая энергия порядка 30 эВ соответствует скорости падающей частицы от 75 км/с для водорода до 20 км/с для кислорода. В случае

Параметры распыления для основных материалов космических пылинок и бомбардирующих частиц

Вещество пылинки	Частица газа	E_{th} , эВ	Y_{max}	E_{max} , эВ
Графит/ углерод	H	30	0.03	200
	He	30	0.2	400
	O/C	30	1	3000
Силикат/ SiO ₂	H	25	0.03	200
	He	25	0.3	500
	O/Ar	25	2	3000
Лед H ₂ O	H	3	1	200
	He	3	5	400
	O/Ne	3	20	3000

столкновений с тепловыми частицами такие скорости означают температуру не менее нескольких сотен тысяч кельвинов; столкновения с нетепловыми частицами на таких (и больших) скоростях означают наличие ударных волн. Очевидно, что распыление силикатных и углистых пылинок в результате столкновений с частицами газа должно происходить преимущественно в остатках сверхновых. Хотя коэффициент распыления существенно выше для столкновений с углеродом и кислородом, доминировать в разрушении пылинки будут все-таки водород и гелий в силу более высокого содержания.

«Классический» подход к моделированию разрушения пылинок с использованием коэффициента распыления справедлив лишь для относительно крупных частиц (с количеством атомов 1 000 и более). Для мелких пылинок ситуация осложняется тем, что бомбардирующая частица взаимодействует не только с поверхностью, но со всей пылинкой. Соответственно выделяют два режима распыления [7]: за счет прямого выбивания (упругие столкновения) и за счет электронного возбуждения (неупругие столкновения). В первом случае падающая частица взаимодействует непосредственно с одним из атомов решетки, и ее энергия распределяется по небольшому количеству атомов. Во втором случае частица взаимодействует с электронным облаком пылинки, и ее энергия распределяется по всем атомам пылинки. Роль неупругих столкновений велика лишь при условии, что падающая частица имеет заряд.

Упругие и неупругие столкновения для макромолекул полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) детально рассмотрены в работах [9, 10]. Аналогичный формализм был распространен на

более крупные углеводородные частицы в работе [11]. Здесь возникают как минимум два принципиальных отличия от классических больших пылинок. Во-первых, даже частица с относительно невысокой скоростью может пролететь сквозь пылинку, не передав ей всю свою энергию. Во-вторых, не вся поглощенная энергия доступна для отрыва атомов решетки. Часть ее может расходоваться на отрыв электронов или переизлучаться. И поэтому для моделирования необходимо не только рассчитывать процесс диссоциации, но и детально рассматривать распределение поглощенной энергии внутри пылинки.

Взаимодействие с излучением

Фотоиспарение крупных тугоплавких пылинок, как видно из таблицы, в типичных межзвездных полях излучения должно быть неэффективным, поэтому взаимодействие с фотонами обычно рассматривается в контексте моделирования эволюции мелких алифатических и ароматических углеводородных пылинок. Хотя для обозначения последних все еще часто применяется сокращение ПАУ, в действительности структура космических углеводородных пылинок, вероятно, более сложная.

Согласно одной из самых современных моделей пыли [12] значительную долю космических пылинок составляют так называемые аморфные гидрогенизированные углистые пылинки, $\alpha\text{-C}(:\text{H})$, охватывающие довольно значительный диапазон составов, от пылинок $\alpha\text{-C}:\text{H}$ со значительной долей атомов водорода (до 60 %) до пылинок $\alpha\text{-C}$, в которых доля атомов H не превышает нескольких процентов.

В работе [13] рассмотрена двухэтапная фотодиссоциация таких пылинок. На *первом этапе* основным каналом диссоциации является отделение атомов водорода. Фотоны, проникающие в пылинку, разрывают связи C–H, приводя к появлению свободного водорода. Разорванные связи атомов C замыкаются друг с другом, приводя к появлению в пылинке кольцевых структур: пылинка постепенно ароматизируется. Число разрушенных связей ограничено глубиной проникновения фотона внутрь пылинки, максимальное значение которой составляет $\sim 200 \text{ \AA}$. Иными словами, мелкие пылинки ароматизируются во всем объеме, а пылинки радиусом больше 200 \AA — только в поверхностном слое. Когда доля атомов водорода X_{H} становится меньше 5 %, начинается *второй этап*, на котором включается другой канал диссоциации — отделение группы C_2 .

Фактически разрушение за счет отделения C_2 эффективно только для мелких пылинок или макромолекул. В частности, в работах [13, 14] показано, что второй этап играет существенную роль лишь для макромолекул с числом атомов менее 50. Для более крупных пылинок основным каналом диссоциации является отсоединение атома водорода [15]. Величина X_H , необходимая для начала второго этапа, у них не достигается.

При моделировании фотодиссоциации пылинок возникает та же проблема, что и при моделировании их распыления при взаимодействии с частицами газа: энергия поглощенного фотона может пойти не только на отрыв отдельных атомов или их групп, но также на ионизацию пылинки или генерацию излучения в инфракрасном диапазоне.

Столкновения пылинок

Процесс дробления пылинок в результате их столкновений друг с другом моделировать гораздо сложнее, чем распыление или испарение пылинок. Проблема в том, что в этом случае приходится рассматривать не одну пылинку, а весь ансамбль пылевых частиц и учитывать в модели распределение пылинок не только по размерам, но и по скоростям (впрочем, эти распределения не являются независимыми). Дополнительная сложность возникает из-за того, что при столкновениях на малых скоростях пылинки не дробятся, а слипаются. Строго говоря, при не слишком экстремальных условиях дробление является не процессом разрушения пыли, а процессом перераспределения пылинок по массам. Лишь при высокой относительной скорости пылинок столкновение может привести к испарению части их вещества.

Детальное исследование процесса столкновения двух пылинок представлено в работах [6, 16]. При столкновении по обеим пылинкам распространяются ударные волны. Если одна из пылинок существенно превосходит по размерам вторую, на поверхности большей пылинки образуется кратер. Расчеты показывают, что распределение образующихся фрагментов по размерам близко к распределению реальных пылинок, что может указывать на важную роль дробления в формировании свойств ансамбля космических пылевых частиц.

Заключение

Перечисленные процессы не единственные механизмы, ведущие к разрушению пылинок. Возможны и другие варианты, например, кулоновский взрыв, когда пылинка разрушается из-за слишком большого электрического заряда; химический взрыв, когда частичное разрушение пылинки (или ее мантии) происходит из-за выделения энергии в химических реакциях, и пр. Роль всех этих процессов в формировании свойств космической пыли очень значительна, однако, к сожалению, их численное описание весьма далеко от совершенства, поскольку значения очень многих параметров взаимодействия пылинок с газом и излучением либо известны очень плохо, либо неизвестны совсем (особенно это относится к оптическим свойствам пылинок). Одна из основных задач в данной области — теоретическое или экспериментальное определение этих параметров.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-02-00521.

Библиографические ссылки

1. *Jones A.* The physical and compositional properties of dust: what do we really know? // ArXiv e-prints. — 2014. 1411.6666.
2. *Fitzpatrick E. L., Massa D.* An analysis of the shapes of ultraviolet extinction curves. II - The far-UV extinction // *Astrophys. J.* — 1988. — Vol. 328. — P. 734–746.
3. *Campeggio L., Strafella F., Maiolo B. et al.* Total to Selective Extinction in the Dark Globule CB 107 // *Astrophys. J.* — 2007. — Vol. 668. — P. 316–330.
4. *Gordon K. D., Clayton G. C., Misselt K. A. et al.* A Quantitative Comparison of the Small Magellanic Cloud, Large Magellanic Cloud, and Milky Way Ultraviolet to Near-Infrared Extinction Curves // *Astrophys. J.* — 2003. — Vol. 594. — P. 279–293.
5. *Draine B. T., Salpeter E. E.* On the physics of dust grains in hot gas // *Astrophys. J.* — 1979. — Vol. 231. — P. 77–94.
6. *Tielens A. G. G. M., McKee C. F., Seab C. G., Hollenbach D. J.* The physics of grain-grain collisions and gas-grain sputtering in interstellar shocks // *Astrophys. J.* — 1994. — Vol. 431. — P. 321–340.
7. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой / под ред. Р. Берип. — М. : Мир, 1984.

8. *Jones A. P.* Dust Destruction Processes : Astronomical Society of the Pacific Conference Series // Astrophysics of Dust / ed. by A. N. Witt, G. C. Clayton, B. T. Draine. — 2004. — Vol. 309. — P. 347.
9. *Micelotta E. R., Jones A. P., Tielens A. G. G. M.* Polycyclic aromatic hydrocarbon processing in interstellar shocks // Astron. Astrophys. — 2010. — Vol. 510. — P. A36.
10. *Micelotta E. R., Jones A. P., Tielens A. G. G. M.* Polycyclic aromatic hydrocarbon processing in a hot gas // Astron. Astrophys. — 2010. — Vol. 510. — P. A37. 0912.1595.
11. *Murga M. S., Khoperskov S. A., Wiebe D. S.* Restructuring and destruction of hydrocarbon dust in the interstellar medium // Astronomy Reports. — 2016. — Vol. 60. — P. 233–251. 1612.00419.
12. *Jones A. P., Köhler M., Ysard N. et al.* The global dust modelling framework THEMIS // Astron. Astrophys. — 2017. — Vol. 602. — P. A46.
13. *Allain T., Leach S., Sedlmayr E.* Photodestruction of PAHs in the interstellar medium. I. Photodissociation rates for the loss of an acetylenic group. // Astron. Astrophys. — 1996. — Vol. 305. — P. 602.
14. *Jochims H. W., Ruhl E., Baumgartel H. et al.* Size effects on dissociation rates of polycyclic aromatic hydrocarbon cations: Laboratory studies and astrophysical implications // Astrophys. J. — 1994. — Vol. 420. — P. 307–317.
15. *Zhen J., Castellanos P., Paardekooper D. M. et al.* Laboratory formation of fullerenes from PAHs: Top-down interstellar chemistry // ArXiv e-prints. — 2014. 1411.7230.
16. *Jones A. P., Tielens A. G. G. M., Hollenbach D. J.* Grain Shattering in Shocks: The Interstellar Grain Size Distribution // Astrophys. J. — 1996. — Vol. 469. — P. 740.